

略论电磁波的产生

宋德生

(桂林电子工业学院)

一些技术史文献试图从技术的角度来阐述电磁波发现的过程,但都无法单一地从技术方面说清它的理论渊源及与理论预言的实验证明的过程.本文试图从电磁学的历史背景、麦克斯韦的理论预言和赫兹的实验证明等方面,来初步讨论发现电磁波的全过程.

一、安培超距论电动力学和 法拉第电磁场论的诞生

1820年4月,丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应,它标志着电磁学的开始.

自从库仑时代以来,法国物理学家们一反其祖辈笛卡尔的涡旋运动的思想,跟随拉普拉斯的物理学简略纲领,将一切物理现象都简化为粒子间的吸引或排斥的力学现象.“电学中的牛顿”——安培带着超距论者的一切特征走进了电磁学.他象牛顿和拉普拉斯把质量分解为无数质点那样,把一个电流视为无数“电流元”的集合,进而推导出类似质点引力公式的电流与电流的相互作用力的公式.安培最先发现,两个螺线管如通有电流,它们将象两根磁棒那样产生相互作用.他由此认为,磁体之所以会相互作用,不是由于它们有什么磁性,而是因为它们有电流,这种电流宛如螺线管中的电流,在它们之间产生的“电动力”便是磁棒相互吸引或排斥的根本原因.这就是安培著名的“磁就是电流”的假说.安培在电流的基础上统一了对电和磁的认识,或者更确切地说,取消了磁的实体.这样就使他能够将复杂的电磁现象或纯磁学现象简化为可以付诸数学分析的电流元的相互作用的形式,从而创立起电动力学(1820—

1827年)^[1].

尽管安培电动力学具有数学形式上的美及其内含着的实体高度统一的优点,但由于它强调超距的电动力作用(即电流与电流的相互作用),忽视了电流周围的空间或场,因而不能解释诸如电磁感应这类现象.阿喇戈和洪堡(A. von Humboldt)1822年在格林威治山测量地磁场强度时发现,金属可以阻尼磁针的振荡.安培则不能对此作出满意的解释.在他看来,磁针中有电流,而金属中没有,二者似不可能相互作用.他的错误在于忽视了运动磁体的电流效应.解决这个问题需要有场的概念,而场在安培理论中是没有位置的.

直到1831年法拉第发现电磁感应定律时,才第一次批判了安培的超距电动力学.法拉第不受各种特设的实体假设的束缚,放于电和磁各种可能的关系.当许多人认为奥斯特发现的电流磁效应是所有电磁关系中唯一基本内容时,他则判断必然有运动的磁感生电流的效应.1831年底,他经过实验获得了这样的认识:在电流或磁体周围存在着一种力的状态,这种力态一经改变或受到扰动,便能使处于这个空间的金属感应出电流.他称这种力态为“电致紧张态”(electro-*tonic state*).为定量描述“电致紧张态”,他引入了磁力线概念.他在这个基础上总结出电磁感应定律^[2].安培不能解释的阿喇戈现象这时迎刃而解了.

法拉第这时已经初步形成了场的概念.1837—1938年间,他在研究静电感应现象时又提出了电力线的概念,批判了泊松等人的超距静电学,将场引入了介质,初步确立了场论的方法^[3].1850年,他在《磁导力》^[4]一文中又提出

了磁导率概念,并根据物质的磁导率将物质区分为顺磁体和抗磁体。翌年12月,他宣读了《论磁力线》^[5],明确指出磁力线是真实存在的实体,是场的表象。1852年,他在《论磁力线的物理特征》^[6]和《论磁物理线》^[7]两篇论文中分析了电力线、磁力线、电流力线、光线、热力线及引力线的共性和特性,在各种力线或场的基础上统一解释了各类自然力的现象。其中颇为新颖的观点是,物体互相联系的桥梁是力线的振动。这里出现了电磁波最原始设想。这种设想深深吸引着年轻的麦克斯韦。

二、麦克斯韦理论预言电磁波

麦克斯韦在剑桥大学三一学院读书时熟读了法拉第的《电学实验研究》,他感到惊奇的是,法拉第虽不是数学家,但他的理论却含有丰富的数学思想。麦克斯韦毕业后立即用数学来总结法拉第的电磁学理论。他在《论法拉第力线》(1855—1856年)^[8]、《论物理力线》(1861—1862年)^[9]和《电磁场的一个动力学理论》(1864)^[10]三篇论文中完成了这项任务,最后预言电磁波的存在。

早在1842年,开耳芬已把拉普拉斯的势函数二阶微分方程普遍用于热、电和磁的运动,建立了这三种相似现象的共同的数学模式;1847年,他又在不可压缩流体的流线连续性基础上,讨论了电磁现象和流体力学现象的共性。麦克斯韦在《论法拉第力线》中运用了开耳芬的分析方法,首先使电力线动力学化,进而确立了物理量的数学分类方法。他成功地将场量分为强度量(如 E, H)和通量(如 D, B, j)两类,发现这两类物理量存在一一对应的线性关系。接着,他就致力于使电磁场动量化。他把电磁场当作一个动力学实体,宛如运动物体一样。既然运动物体具有动量,那么电磁场也应具有动量。他看出,法拉第的“电致紧张态”就是他所寻找的电磁场动量。因为在法拉第电磁感应定律中,只有当“电致紧张态”改变时,才能产生电动力,这正如一个运动物体在改变其运动状态时才能

产生力一样。麦克斯韦于是从力学关系

$$F = dP/dt$$

平行推导出电场强度与电磁场动量 A 的关系:

$$E = dA/dt. \quad (1)$$

他在这个基础上总结出电磁场六条基本定律^[11]。

麦克斯韦跟十九世纪光波动论者一样,求助于以太。他把以太当作电磁场的弹性载体。他所推出的电场强度与电位移的关系

$$E = KD, \quad (2)$$

再次表明他是用力学的方法来处理电磁场,式(2)如同胡克定律 $F = Kx$ 一样。他引入的“电位移”一词包含着电磁学的动力学化的深刻含义。这个词已成为十九世纪经典电磁学的遗迹,就连麦克斯韦本人后来也修改了电位移的定义,将它定义为

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}, \quad (3)$$

此处 Q 表示通过以 r 为半径的球面的电量。

麦克斯韦在《论物理力线》一文中,根据亥姆霍兹的涡旋流体方程推导出电磁场的运动学方程:

$$j = \frac{1}{4\pi} \nabla \times H \quad (4)$$

和动力学方程:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{dH}{dt}. \quad (5)$$

电磁场动力学方程表明磁扰动可以产生电场,而电磁场运动学方程表明磁场中存在电流,不论电磁场中是否存在导体都应如此。介质或真空中存在电流,这是传统观念所不能接受的。麦克斯韦在这里大胆预言位移电流的存在,并把它定义为 dD/dt 。有了位移电流,电磁场中的电扰动和磁扰动就一环扣一环地联系起来。电磁波的概念就这样产生了。

从菲涅耳起,光被认为是弹性以太的横向振动,其速度由

$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (6)$$

来决定。式中 K 为光弹介质的弹性模量, ρ 为

其密度。

麦克斯韦仿照光波动理论,假设电磁波是电磁场介质的横向振动,波速取式(6)的形式,并取电磁场介质密度为 $4\pi\mu$, μ 为磁导率;至于弹性模量 K ,则由 $E = KD$ 取出,再根据式(3)和 $E = c^2 \frac{Q}{r^2}$ 的关系,得到 $K = 4\pi c^2$,最后代入式(6)得

$$v = c/\sqrt{\mu}. \quad (7)$$

在真空条件下 $\mu = 1$,所以 $v = c$ 。

这里的 c 是电量的电磁单位对静电单位的比值,科尔劳希和韦伯在1856年测得这个比值为310,740,000米/秒,恰好是布喇德雷、斐索和傅科所测得光速值。麦克斯韦由此断定:电磁波在真空中的速度等于光速!

1864年,麦克斯韦在《电磁场的一个动力学理论》一文中,用拉格朗日分析力学的方法推导出电磁场方程组,它们由二十个分量方程(或八个矢量方程)组成^[11]。他由这个方程组推导出电磁波动方程:

$$K\nabla^2 \mathbf{B} = 4\pi\mu \frac{d^2 \mathbf{B}}{dt^2}, \quad (8)$$

此处 $K = 4\pi c^2$ 。显然,电磁波速度 $v = c/\sqrt{\mu}$ 。这样就进一步肯定了他在1861—1862年所得的结论。

1873年,麦克斯韦在《电学和磁学专论》一书中预言光压存在,第一次用电磁波理论解释了光压,并算出光压的大小等于电磁场的能量密度^[12]。

三、亥姆霍兹与1879年悬奖

1845年,德国物理学家诺埃曼发展了安培的超距电动力学,创立起德国电动力学体系。他成功之处在于用数学总结了电磁感应定律^[13]:

$$\epsilon_i = - \oint \frac{d\mathbf{A}}{dt} \cdot d\mathbf{s}, \quad (9)$$

此处 ϵ_i 为感生电动势, \mathbf{A} 是他引入的“矢量势”:

$$\mathbf{A} = F(\mathbf{j}/r). \quad (10)$$

在现在的教科书中,麦克斯韦的电磁场动量和诺埃曼的矢量势已成为同一个量,统称为矢量势或矢势。但是在历史上,二者是有所区别的,前者在麦氏理论中是一个基本量,体现了无源场的特点;而后者是电流的位置函数,体现了有源的数学场的概念。虽然诺埃曼电动力学解决了电磁感应定律的数学问题,但它仍然缺乏必要的物理场的概念,所以仍属于超距电动力学的范畴。最突出的例子是,它只能解决闭合回路的振荡问题,对于开路振荡的情况,它就无能为力了。

1846年,韦伯在德国创立了另一个电动力学体系,他成功地将库仑静电力、安培电动力和法拉第电磁感应力统一在一个公式——韦伯电作用力公式中。不幸的是,他只考虑一种运动电粒子对另一种运动电粒子的作用,这种作用力仍是沿直线传递、且不需传递时间的“中心力”。因此韦伯电动力学也是一种超距电动力学。

除安培、诺埃曼和韦伯三个超距电动力学体系外,当时还有一种准超距电动力学,这个体系是由德国的黎曼和丹麦的洛伦兹形成的。这个理论已经考虑电磁力传递的时间问题,推迟势的概念就是他们提出来的。

综上所述,十九世纪中叶的电磁学远非达到了统一,亥姆霍兹将这一时期的电磁学称为“无路的荒原”^[14]。

从1870年开始,亥姆霍兹着手试探各种电磁学理论是否存在可以统一的基础,他很快发现韦伯电动力学与能量守恒定律相违,首先否定了它。接着,他又认识到,如果麦克斯韦电磁学理论正确的话,那么诺埃曼电动力学就可以作为麦克斯韦理论的一个特殊情况。例如,我们可以把闭合电路当作有电容器的电路的一个特例。但是,这首先必须证明位移电流的存在。根据这种考虑,亥姆霍兹在1879年以“用实验建立电磁力和绝缘体介质的极化的关系”为题,设置了柏林科学院奖。这个命题由三条假设组成:(1)如果位移电流存在,必定会产生磁效应;(2)变化的磁力应该能使绝缘体介质产生位移电流;(3)在真空中上述两条假设同样成

立^[45]。亥姆霍兹后来考虑到第三条假设的证明太难，就把它删掉了。这个命题便是赫兹实验证明电磁波存在的出发点。

四、赫兹实验证明位移电流的存在

亥姆霍兹希望他的学生赫兹解决柏林科学院悬奖的课题，但是赫兹感到无从下手，搁置了起来。1885年，赫兹来到卡尔斯鲁高等工业学校任实验物理学教授。他发现该校实验室里有一种名为里斯(Riess)螺管的振荡线圈。这种线圈有初级和次级，若给初级线圈输入一脉动电流，在次级线圈的端隙里便会产生电火花。赫兹判定这是电流振荡感应的结果。他又发现，如果调整初级与次级的相对位置，火花会有明显变化，甚至次级线圈在某些位置上根本不会产生电火花。他由此联想到，如果在振荡线圈附近放一块介质，交变电磁力将使介质极化而产生位移电流，位移电流产生出新的电磁作用，叠加在原来的电磁场上，这样就会使火花隙重新冒出电火花。赫兹抓住了这个思路，认为解决1879年悬奖的课题的时机成熟了。

1887年，赫兹设计了一台“感应秤”(induction balance)，结构如图所示。A-A'是偶极振荡器，B是带有火花隙的共振器，起着检验电磁波方向和强度的作用。实验时给偶极振荡器输入一高频强力电流，A-A'之间的火花隙产生明亮的火花，说明电磁波已经发射。这时将共振器B移近振荡源，它上面的火花隙也会产生电火花。赫兹沿B的轴线旋转共振器，直至它不再冒火花为止，他称这个位置为“中性点”位置。赫兹再将一块金属C移近振荡器，共振器的火花隙再次产生了电火花。这是金属块中感生涡流电产生新的电磁波破坏了B原来的电态平衡的结果。如果把C移走，代之以一块介质(图中未画出)，若上述情况会再发生的话，则说明介质块在交变电磁力作用下真的产生了位移电流。赫兹先后将制成厚板的沥青、人造沥青、纸、干木、砂石、硫黄、石蜡，以及用橡皮槽盛好的45公升汽油移近“感应秤”，预料中的情况果

物理

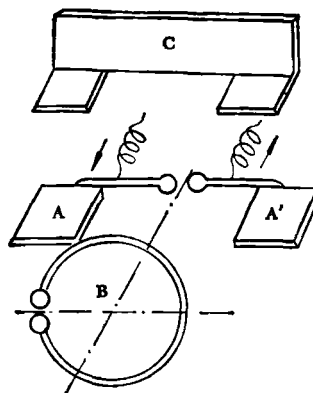


图1 感应秤略图

然发生了——原处于“中性点”位置的共振器B发射出电火花来。

赫兹就这样成功地证明了位移电流的存在，因而获得了柏林科学院1879年的悬奖。这项成果载于他的《论绝缘体中电扰动产生的电磁效应》^[46]一文中。

五、电磁波和光波的同性的实验证明

证明位移电流的存在还不足以说明电磁波的存在，因为超距论者会说，这是超距电磁力的结果。为了捍卫麦克斯韦电磁场理论的完整性，赫兹又进行了电磁波速的测量，并完成了电磁波与光波的同性的实验证明。

早已有人测量电磁力传递速度或电磁波速，如法拉第在1857—1858年间和亥姆霍兹在1871年所进行的实验，但无一成功^[47]。究其原因，是他们对电磁波的巨大传播速度估计不足，以致用了过于直接的方法。

1888年3月，赫兹进行了划时代的测量电磁波速的实验。他吸收了前人失败的教训，不去直接测量速度，而是用驻波的方法先测出驻波波节长(半波长)，他测出他所形成的驻波的波长为9.6米，又根据麦克斯韦关于电磁波速等于光速的结论，算出该电磁波的振荡周期为 1.55×10^{-8} 秒。然后，他用开耳芬在1853年确立的振荡器振荡周期公式，计算出他所使用的偶极振荡器的振荡周期为 1.4×10^{-8} 秒。这两

个周期之差仅有 0.15×10^{-8} 秒,他把这个微小偏差归结为测量精度,从而肯定了电磁波速等于光速。他把这项成果总结在他的论文——《论空气中的电磁波和它们的反射》^[18]中。

完成电磁波速等于光速的证明,还不等于完成了电磁波和光波的同性的证明,因为这个同性证明还应该包括在电磁波中显示光波的所有物理性质。英国著名电磁学家、麦克斯韦理论的追随者洛吉(O. Lodge)曾试图用一种直观的方法直接证明电磁波是光波,可是失败了。他在1882年用一个级联变压器做实验。这种级联变压器的每一级都能从前面一级拾取高频成分,越往后面,输出的频率就越高。洛吉希望在最后一级输出端之间看见可见光,然而他失望了,因为最后一级输出的电磁波的频率离释放可见光的最低频率还差很远^[19]。

赫兹在1888年脚踏实地地进行了电磁波和光波同一性的实验证明^[20]。他用一根直径为3厘米、长为26厘米的偶极振荡器发射电磁波。电磁波经金属面反射,形成波长只有66厘米的短波驻波,他用金属面使电磁波作了45度的反射,用高为2米,孔径为1.2米的金属抛物面使电磁波聚焦,用金属栅使电磁波偏振,用一个硬沥青大棱镜使电磁波折射等等。结果,光波所具有的一切物理性质,在电磁波上都显示了出来。赫兹就这样完成了电磁波和光波的同性的证明,从此宣告人类发现了电磁波!

赫兹完成这项工作时年仅31岁,可是在他还没走完第37个春秋时,就因牙疾和血液中毒

而与世长辞了。

致谢: 本文写作过程中,笔者承蒙中国科学院物理研究所李国栋先生的鼓励和指导。谨表深切谢意。

参 考 文 献

- [1] A.-M. Ampère, *Théorie Mathématique des Phénomènes Electrodynamiques*, (1827), Blanchard, Paris, (1958).
- [2] M. Faraday, *Phil. Trans.*, **123**(1832), 125.
- [3] M. Faraday, *Phil. Trans.*, **129**(1838), 1—40.
- [4] M. Faraday, *Phil. Trans.*, **141**(1851), 29—122.
- [5] M. Faraday, *Phil. Trans.*, **142**(1852), 1—56.
- [6] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, Bernard Quaritch, London, Vol. 3(1855), 407—437.
- [7] *ibid.*, pp. 483—543.
- [8] J. C. Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, W. D. Niven ed., Vol. 1,(1927), 155—229.
- [9] *ibid.*, 451—513.
- [10] *ibid.*, 526—597.
- [11] 宋德生,物理, **11**(1982),378—383.
- [12] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon, London, Vol. 1, (1893), Arts., 161—163; Vol. 2, (1893), Arts., 278—282.
- [13] E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Longmans, Green and Co., (1910), 222.
- [14] R. S. Turner, *Dict. Sci. Biogr.*, Charles Scribners and Sons, New York, Vol. 6, (1972), 250.
- [15] S. Dagostino, *Hist. Stud. Phys. Sci.*, Ed. R. McCormach, Princeton Univ. Press, Vol. 6, (1975) 282.
- [16] H. Hertz, *Electric Waves*, New York, (1962), 95—106.
- [17] 宋德生,自然杂志, **5**(1982), 377—381.
- [18] H. Hertz, *Annalen der Physik*, **34**(1888), 610.
- [19] T. K. Simpson, *ISIS*, **55**(1966), 411
- [20] H. Hertz, *Annalen der Physik*, **36**(1889), 769.

(上接第170页)

(如膀胱、眼睑、尿括约肌等)的功能。利用电磁动力原理可制成人工心脏输血器。利用高梯度磁分离原理,可制成红、白血球分离器,将顺磁性的非氧合血红蛋白分离出来。磁性液体可用于封闭肿瘤的供血管,或在施行特殊手术时应用。利用电磁感应原理,将含亚毫米大小的永磁颗粒的软透镜吸附在眼角膜上,用灵敏磁强计可测出约 $2\mu\text{m}$ 的眼球运动。

总之,从上面的介绍可以看出,生物磁学在医学中的应用是相当广泛的,它的发展前景也

是十分广阔的。

参 考 文 献

- [1] 李国栋,生物磁学及其应用,科学出版社(1983).
- [2] 陈植,磁疗法,湖南科学技术出版社,(1979).
- [3] 李国栋,中华物理医学杂志, **2**(1980), 161; **3**(1981) 117, 186; **4**(1982), 107; **5**(1983), 112.
- [4] Evné, et al., *Biomagnetism*, Berlin, de Grueter, (1981).
- [5] I. L. Pykett, *Scientific American*, **246-5**(1982), 54.
- [6] *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG6-2** (1970), 307—375.
- [7] E. H. Frei, *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 955.
- [8] A. Kolin, *Phys. Today*, **21-11**(1968), 39.